

EVOLUCIÓN DE USOS DEL SUELO Y VULNERABILIDAD A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE EN EL MEDITERRÁNEO SUR PENINSULAR

PÉREZ GONZÁLEZ, M^a Eugenia¹, SILLERO MEDINA, José Antonio², RUIZ-SINOGA, José Damián³

1 Departamento de Geografía. Universidad Complutense. 28040 Madrid; meperez@ucm.es

2 Instituto de Geomorfología y Suelos. Universidad de Málaga. 29071 Málaga; jasillero@uma.es

3 Instituto de Geomorfología y Suelos. Universidad de Málaga. 29071 Málaga; sinoga@uma.es

RESUMEN: Este trabajo pretende conocer la vulnerabilidad actual a los procesos erosivos de los suelos en dos cuencas hidrográficas del Mediterráneo Sur peninsular, y evaluar si los cambios acaecidos durante las 3 o 4 décadas precedentes han incrementado o frenado dicho riesgo ambiental. Para ello se han seleccionado dos cuencas hidrográficas de Málaga caracterizadas por condiciones climáticas mediterráneas, con matices dispares, mediterráneo subhúmedo al oeste, semiárido al este, y con una cubierta vegetal muy modificada por la actividad humana desde hace más de 2.000 años. Cada una de las cuencas seleccionadas se ubica a un lado del gradiente pluviométrico longitudinal del litoral mediterráneo, con lo que cabe suponer una desigual dinámica hidro-geomorfológica, manifestada en una variabilidad espacio-temporal de los procesos geoambientales.

El análisis de cambios y variabilidad se realiza a partir de información visual y digital de imágenes multispectrales de los satélites Landsat 5 y 8, Spot-5 y Sentinel 2, de las que se extrae información temática relevante, no visible en fotografías aéreas convencionales. Para clasificar las diferentes cubiertas del suelo se aplicaron mejoras en las imágenes, así como índices de vegetación y suelo. Esta aproximación escalar se complementa con la obtenida en análisis de propiedades edáficas indicadoras, realizadas en más de 450 puntos de muestreo.

Los resultados muestran la existencia de un ciclo de retroalimentación orgánico, que se manifiesta en las áreas más húmedas, con un control de los factores orgánicos sobre los procesos erosivos y de degradación de las formaciones superficiales, mientras que en las más secas, con un control del ciclo de retroalimentación estructural, mediante bloqueo superficial, y por tanto, una mayor incidencia de los procesos de degradación del suelo.

PALABRAS-CLAVE: Imágenes de satélites; clasificaciones temáticas de imágenes; usos del suelo; susceptibilidad a los procesos erosivos.

1. Introducción

La degradación del suelo, la disminución de su capacidad productiva y de proporcionar servicios ecosistémicos, tiene su origen en la erosión acelerada, salinización, acidificación, agotamiento del carbono orgánico del suelo (SOC), reducción de la biodiversidad y desequilibrio estructural. El cambio climático afecta y se ve afectado por la degradación del suelo a través de un proceso de retroalimentación positivo debido fundamentalmente al aumento en la mineralización del SOC, lo que incide en los cuatro tipos de sequía (meteorológica, hidrológica, pedológica, y ecológica). Este ciclo de retroalimentación, está a su vez fuertemente influenciado por factores sociales, económicos, políticos y culturales (Ruiz-Sinoga y Romero-Díaz, 2010).

La restauración de suelos degradados y la conversión de áreas agrícolas marginales a pastizales y tierras forestales, unido a ciertas prácticas de manejo recomendadas, incrementan el potencial de captura de carbono mejorando tanto el sistema ecogeomorfológico como la productividad agronómica. Son diversas las prácticas de gestión recomendadas, entre las que destacan, el uso de la agricultura de conservación, estableciendo cultivos de cobertura, adoptando estrategias de manejo integrado de nutrientes, y aquellos que garantizan la conservación de suelo / agua dentro de una cuenca (Hueso *et al.*, 2016).

La mayor parte de estas recomendaciones se basan en investigaciones, que con diferentes herramientas, puesta en marcha de sistemas de modelización, y mecanismos de participación de la comunidad, proporciona sistemas de apoyo a las decisiones para los responsables de la formulación de políticas y los administradores de tierras (Lal, 2012). En ese sentido, los estudios medioambientales vienen incorporando información de satélite desde 1972, gracias a la pionera serie Landsat, y las aplicaciones se multiplican conforme se suman plataformas, mejora la resolución, cobertura y frecuencia orbital de los sensores disponibles (Chuvieco, 2016). A pesar del amplísimo registro digital su incorporación masiva en la evaluación de cuencas hidrográficas se ha visto limitada años atrás por su elevado coste. La reciente accesibilidad de numerosas imágenes, a partir de la segunda década del siglo XXI, anima a incorporar estos magníficos documentos en aquellas investigaciones que requieran datos sobre el estado,

uso y coberturas del territorio. Gracias a la extensión temporal de las imágenes Landsat y Spot numerosos autores las han utilizado para detectar suelos degradados a escala media (Zhou et al., 2008), y en relación con algunas prácticas agrícolas en regiones montañosas con rasgos similares al área que aquí nos ocupa (Krishna, 2009; Ben Hamman Lech-hab, 2015). A los dos satélites medioambientales anteriores se les une desde 2015 el europeo Sentinel 2 con destacadas mejoras, y con la ventaja de mantener los mismos canales espectrales de los predecesores, lo que facilita estudios espacio-temporales desde los años setenta a la actualidad.

El objetivo de este trabajo es realizar una cartografía a escala media sobre la susceptibilidad a la erosión del suelo de dos cuencas hidrológicas de la fachada sur mediterránea peninsular. Se trata por tanto de determinar los sectores de las cuencas con predisposición a la pérdida y/o degradación del suelo. Esta cartografía pretende ser una aproximación a la vulnerabilidad a la pérdida de suelos y a las inundaciones, esto es, a conocer qué sectores serán incapaces de resistir a los fenómenos amenazantes o de reponerse una vez ocurrido, como sucede con frecuencia con las precipitaciones de gran intensidad. A su vez, se trata de estimar los cambios de usos del suelo a lo largo de las últimas décadas, para conocer la tendencia de la cobertura vegetal (natural y agrícola) y variaciones del sellado del suelo en dos cuencas relativamente próximas, pero con matices contrastados de mediterraneidad. Los resultados aquí obtenidos son exploratorios, previos a las correlaciones con datos de muestreos del suelo, pero necesarios para la modelización hidrológica de las cuencas, aspectos que forzosamente se tendrán que abordar en otros trabajos.

2. Materiales y métodos

En primer lugar, se analizaron las características pluviométricas de las dos cuencas seleccionadas, durante los últimos 25 años, a partir de datos anuales, diarios, horarios y cincominutales, considerando los observatorios (AEMET y Red SAIH-HIDROSUR) de Casarabonela (525 m) y Benamargosa (146 m). A su vez, se seleccionaron imágenes que mostrasen la mayor variabilidad temporal intra-anual e interanual de las cubiertas y rasgos del suelo. Las imágenes escogidas, fechas y características se muestran en la tabla 1.

Tabla I. Imágenes de satélite y MDTutilizados. - Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/> y <http://centrodedescargas.cnig.es/>

Imagen	Escena	Resolución	Fecha
Landsat-5	201/034	30 m	18/04/1992; 02/09/1995
Sentinel-2	T30SUF	10,20 y 60 m	19/04/2018; 06/09/2017
Spot-5	276/035	10 y 2,5 m	29/06/2013
MDT (formato (.asc)	UTM30N	5 m	2015

Cada imagen y modelo digital del terreno (MDT) se recortó conforme a los límites de las cuencas hidrográficas. El software Erdas Imagine 2016 se utilizó para corregir las imágenes del efecto atmosférico, mediante la mejora radiométrica de reducción de niebla. También para extraer valores de las diferentes imágenes y aplicar los algoritmos de mejoras e índices específicos. Los que mejores resultados ofrecen aquí son la mejora espectral *tasseled cap*, índices de vegetación normalizado (NDVI) y el mejorado de absorción de clorofila (MCARI2), (Chuvieco, 2016), e índice de arcilla, derivado del cociente entre los dos canales infrarrojos medios. Por último, se obtienen las imágenes de cambios entre fechas: 1992/95 y 2017/18 de los índices más representativos y se ha medido su fiabilidad mediante la matriz de confusión.

3. Área de estudio

El trabajo se centra en dos cuencas hidrográficas representativas del paisaje de montaña media mediterránea (Málaga, España) y situadas a lo largo del umbral de degradación definido por Ruiz-Sinoga y Romero-Díaz, (2010). Una, la del río Grande de 38,42 km² y 719,03mm/año tiene un clima mediterráneo con matiz subhúmedo-húmedo, y la otra, del río Benamargosa de 181,23 km² y 562,61mm/año tiene un clima mediterráneo seco. Excepto las diferencias pluviométricas, se trata de dos cuencas muy similares, que han sido tanto históricamente como en la actualidad intensamente antropizadas, con varios núcleos de población en cada una de ellas, dominio de cultivos leñosos (olivar, almendro, vid, aguacate, mango, etc.), y unas pequeñas áreas de regadío de fondo de valle o de bancales en el entorno de los pueblos. La existencia de una amplia zona forestal en la Cuenca de Rio Grande, marca la única diferencia entre ambas.

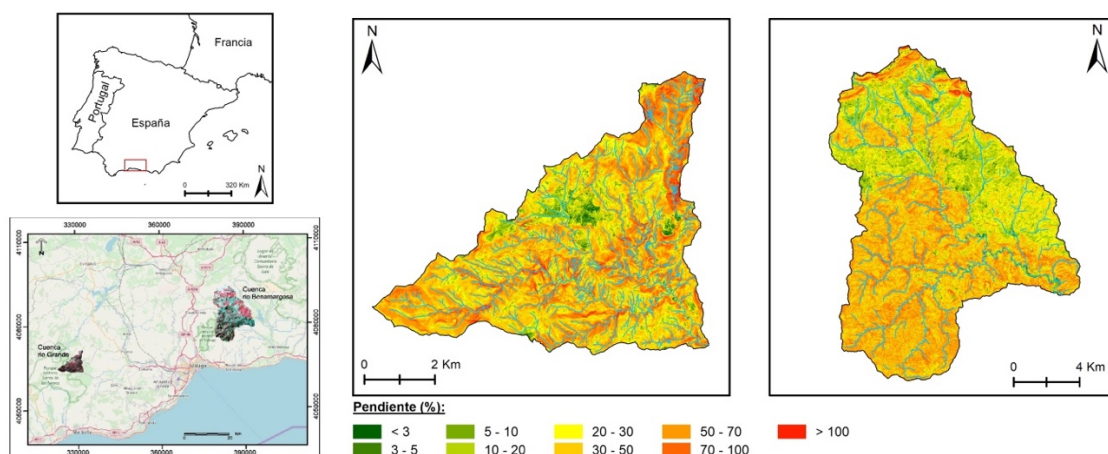


Fig. 1. Mapa de pendientes de las cuencas Grande y Benamargosa - Fuente: MDT05, IGN.
Elaboración propia.

La geomorfología está muy condicionada en las dos cuencas por la pendiente, en donde predominan las formaciones paleozoicas compuestas de esquistos, micaesquitos, filitas, generadoras de relieves muy desgastados, junto a las vigorosas calizas del cretácico. Es el factor pendiente, un condicionante, que unido a las características del suelo, hace sospechar en la existencia de graves problemas de erosión (Fig. 1).

4. Resultados y discusión

Se ha observado un leve descenso en la precipitación anual, y otro más acusado en el número de días de lluvia, dando esto lugar a un incremento en la intensidad de la pluviometría de ambas cuencas. Siguiendo la clasificación de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), donde se cataloga como precipitación torrencial aquella superior o igual a 100mm diarios, 60mm horaria o 5mm en cinco minutos, podemos afirmar que en nuestro ámbito de estudio, la precipitación considerada como “geomorfológica”, aquella con capacidad de movilizar suelo e iniciar los procesos de erosión, es la de menor duración, aquella caída en pequeños episodios esporádicos que llega a intensidades de hasta 18,2mm en cinco minutos (Benamargosa, 17/11/2012 -10:40:00). Estos eventos se repiten prácticamente cada año, con más frecuencia en los meses otoñales.

En los últimos 25 años, en la cuenca del río Benamargosa, la precipitación torrencial cincominutal aparece en 25 ocasiones, siendo 20 lluvias post-estío, mientras que en la cuenca del río Grande la cifra disminuye hasta los 18 episodios, de los que 16

se produjeron al final del verano. Esta caracterización de la dinámica pluviométrica funciona como premisa para conocer los procesos de degradación y de alteración del sistema eco-geomorfológico.

Mediante la mejora espectral *tasseled cap* se han determinado algunas características superficiales sobre las que se produce la precipitación torrencial, donde destaca una mayor extensión de biomasa vegetal en la cuenca occidental (Grande), con masas forestales destacadas en la mitad suroccidental (pinsapar, castañar, pinares, encinares, etc.) y una densa vegetación de ribera. Esta se representa con menor extensión en la cuenca oriental (Benamargosa), coincidiendo con los regadíos del tramo bajo del río, y con pequeños enclaves forestales al N y SW. En ambas, el suelo más degradado y susceptible a la erosión queda representado principalmente en los núcleos, en entornos rurales, en áreas de actividades mineras, infraestructuras, vertientes pronunciadas y en parcelas de cultivo abandonadas.

En las imágenes de satélite Landsat y Sentinel, con bandas espectrales en el infrarrojo medio (SWIR), los suelos desnudos pueden representarse a escala media gracias a la mayor intensidad de la radiación emitida frente a otras cubiertas (Dwivedi, 2017), principalmente de las ocupadas por vegetación, categoría que se discrimina bien por su distinto patrón espacial y espectral. No obstante, otros materiales también registran valores digitales elevados en los canales SWIR, como el roquedo, con desigual respuesta según su tipología, y los suelos sellados o impermeabilizados, en general con una elevada respuesta a estos infrarrojos.

A partir del llamado índice de arcilla (B5/B7 en L5 y B12/B11 en S2), seleccionado en la fecha más reciente, con menor cubierta vegetal, se ha cartografiado la reflectividad del suelo, con el objetivo de localizar los sectores más susceptibles a la erosión del suelo, por su mayor desprotección frente a las lluvias torrenciales, si bien se incluye en la categoría más alta tres unidades muy dispares: roquedo, suelos desnudos y sellados (en tonos rojizos, Fig. 2). Entre ambas cuencas se detectan claras diferencias, es la cuenca occidental la que posee una mayor cobertura vegetal, con un 14,91% de la superficie total ocupada por el pinsapar, aunque otros suelos están muy desprotegidos, con una extensa actividad olivarera (28,35% de la superficie total), de amplio marco de plantación, y ocupación agrícola en vertientes pronunciadas, de lo que cabe deducir un alto riesgo de erosión, que se manifiesta en la profusión de cárcavas y regueros. La cuenca de Benamargosa, refleja mucha mayor superficie con alto riesgo de erosión, de

hecho los suelos más cubiertos (índice bajo, Fig. 2) se limitan a los cultivos de la llanura de inundación y pequeños enclaves de repoblación de bosque mediterráneo.

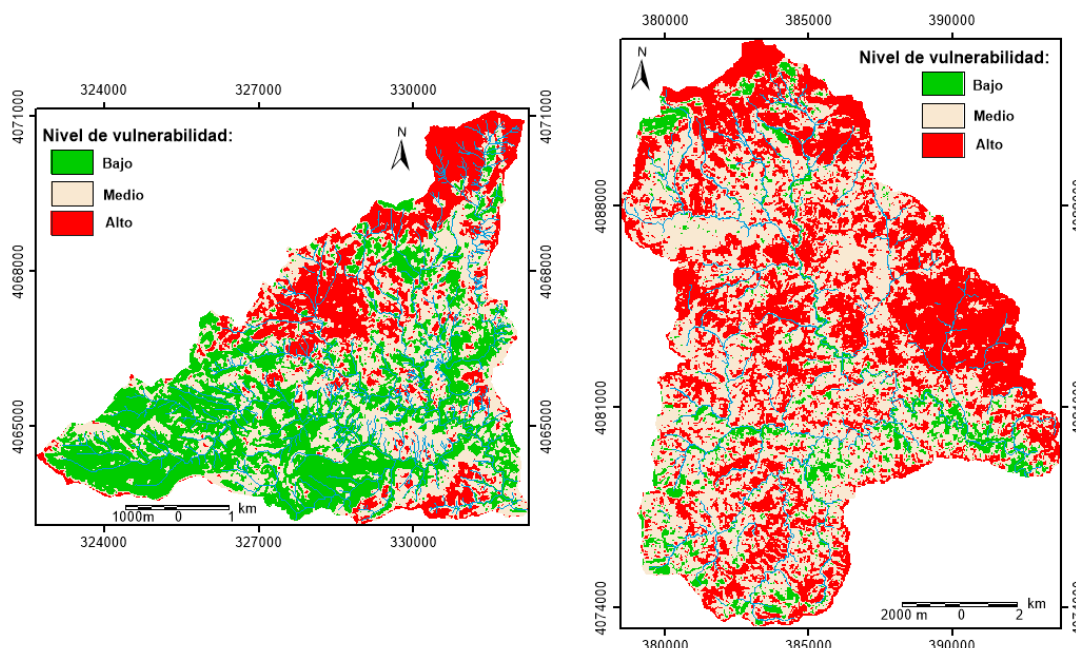


Fig. 2. Nivel de susceptibilidad a partir del índice de arcilla en las cuencas Grande (Izquierda) y Benamargosa, (Derecha) - Fuente: Sentinel 2 (6/09/2017). Elaboración propia.

Por otro lado, la evaluación de cambios intra-anales medida mediante los índices de vegetación, ofrece mejores resultados con el índice mejorado de absorción de clorofila. Aunque los cambios en la biomasa vegetal entre primavera y verano son consustanciales en climas mediterráneos, aquí quiere destacarse cómo afecta espacialmente, y conocer la tendencia de los últimos veinticinco años. La respuesta de la vegetación que se agosta en verano ha experimentado en las dos cuencas un notable retroceso, debido a la mayor superficie sellada actual, retroceso de la actividad ganadera y abandono de extensas superficies agrícolas en secano en favor del regadío, más selectivo en los emplazamientos y de menor extensión.

Tabla II. Cambios estacionales o intra-anales en las dos cuencas Sur-Béticas – Fuente: Landsat 5 (02/09/1995; 18/04/1992) y Sentinel 2 (19/04/2018; 6/09/2017). Elaboración propia.

	CUENCA GRANDE		CUENCA BENAMARGOSA	
	92-95	17-18	92-95	17-18
Descensos (%)	54,20	23,3	93,7	63,2
Incrementos (%)	1,40	3,2	0,02	0,08

Comparativamente, la cuenca más occidental y húmeda (Grande) registra descensos estacionales del 54,2% en los noventa al 23,3% actual, (Tabla II). Sólo se advierte un leve incremento de superficies forestales, que pasan del 1,4 en los noventa al 3,2% en 2017/18, debido a la extensión de castaños y recuperación de algunos bosques. El cambio es radical en la cuenca del río Benamargosa, que pasa de una pérdida masiva de biomasa del 93,7% en 1992/95 al 63, 2% 2017/18, sin apenas incremento, (del 0,02 al 0,08% en los mismos períodos), localizados en las parcelas del tramo bajo del río. Esta situación coloca a ambas cuencas en una condición de extrema vulnerabilidad ante el riesgo de erosión, derivado de la dependencia de la torrencialidad de las primeras lluvias post-estivales.

Por último, los cambios en la protección vegetal del suelo en las cuencas se han medido a partir del NDVI de abril 1992 y 2018 (Fig. 3). La cuenca subhúmeda refleja un incremento de biomasa vegetal considerable (18,6 %), del bosque mediterráneo y de las explotaciones de castaños, frente a un leve y localizado descenso (0,7%). Por el contrario, la cuenca de Benamargosa, registra un incremento mucho menor (9,2 %), localizado básicamente en la vegetación de ribera, frente a la pérdida del 2,8 %. Este valor está espacialmente concentrado en los suelos del centro y este de la cuenca, que ven reducidos sus pequeños enclaves forestales en favor de nuevas actividades agrícolas (frutales) que transforman el paisaje (bancales) y dejan gran parte del suelo descubierto.

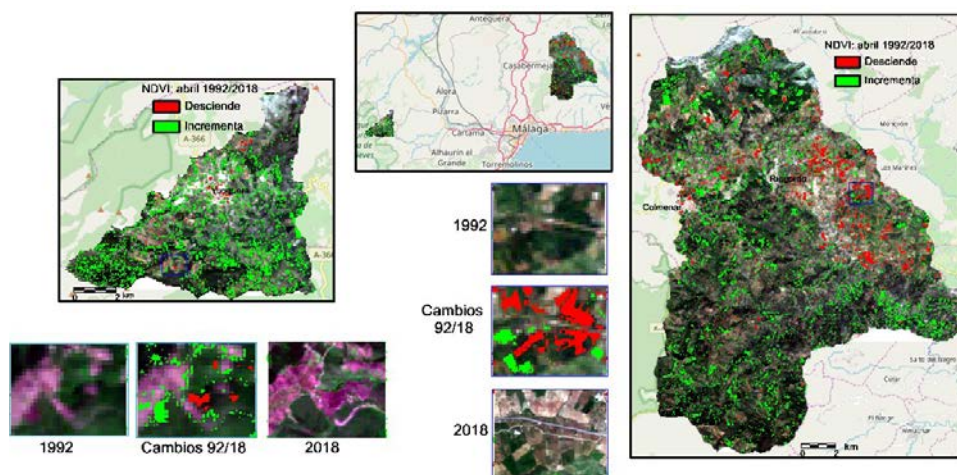


Fig. 3. Cambios entre 1992 y 2018 en la cubierta vegetal del suelo medido a partir del NDVI -

Fuente: elaboración propia a partir de imágenes Landsat (18/04/92) y Sentinel 2 (19/04/2018).

Debe matizarse que algunos cambios vienen motivados por la mejora de la resolución espacial en las imágenes más recientes, hecho que afecta más a las masas

forestales (incrementos), que a los elementos pequeños y/o lineales (descensos). No obstante, a escala media, la fiabilidad de los mapas de cambios supera el 90%, hecho que se destaca en los detalles de la figura 3, donde el bosque mediterráneo es sustituido por suelos desnudos, derivado del abandono o por parcelas de cultivos o viceversa.

5. CONCLUSIONES

Se ha constatado que para ambas cuencas existe una mayor vulnerabilidad en los meses de verano, donde los niveles de cubierta vegetal son menores al resto del año. Los episodios catalogados como aguaceros geomorfológicos alcanzan su mayor frecuencia en los primeros días del otoño, donde la protección es mínima y donde la sequía estival mediterránea provoca en gran parte de los suelos condiciones de hidrofobicidad. Este cómputo de circunstancias provoca una situación de máxima fragilidad, mayor en la cuenca de Benamargosa, que desemboca en una gran pérdida de suelo y una degradación general del paisaje mediterráneo. Destacan los sucesivos cambios de uso forestal a agrícola en la cuenca más seca, detectados mediante análisis de imágenes intra y multianuales, que supone un agravante de esta susceptibilidad comentada.

6. BIBLIOGRAFIA

- Ben Hamman Lech-hab, K., Issa, L.K., Raissouni, A., El Arrim, A., Tribak, A.A. and Moussadek, R. (2015). Effects of Vegetation Cover and Land Use Changes on Soil Erosion in Kalaya Watershed (North Western Morocco). *International Journal of Geosciences* 6, 1353-1366.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing: An Environmental Approach*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Dwivedi, R.S. (2017). *Remote sensing of soils*. Springer, 497.
- Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J. F., Ruiz-Sinoga, J. D. 2016. Effects of topsoil treatments on afforestation in a dry Mediterranean climate (southern Spain). *Solid Earth* 10/2016; 7(5):1479-1489., DOI:10.5194/se-7-1479-2016
- Krishna Bahadur, K.C. (2009). Mapping soil erosion susceptibility using remote sensing and GIS: a case of the Upper Nam Wa Watershed, Nan Province, Thailand. *Environmental Geology* 57, 695.
- Lal, R. (2012). Climate Change and Soil Degradation Mitigation by Sustainable Management of Soils and Other Natural Resources. *Agric Res* 1(3), 199–212.
- Ruiz Sinoga, J. D., Romero Díaz, A. (2010). Soil degradation factors along a Mediterranean pluviometric gradient in Southern Spain. *Geomorphology* 118, 359-368.

Zhou, P., Luukkanen, O., Tokola, T., Nieminen, J. 2008. Effect of vegetation cover on soil erosion in a mountainous watershed. *Catena*, 75(3), 319-325.